



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SVAŘOVÁNÍ POMOCÍ LASEROVÝCH STROJŮ

WELDING WITH LASER MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Anna Hanáková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Studentka: **Anna Hanáková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Milan Kalivoda**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Svařování pomocí laserových strojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedno z možných využití laserového paprsku je v oblasti svařování. Téma se zabývá konkrétním pohledem na strojový park, technologické využití, výhody a nevýhody procesu, experimentální sestavy, ekonomické podmínky a některé další návaznosti.

Cíle bakalářské práce:

- Charakteristika laserových strojů ve strojírenství
- Svařovací procesy
- Zkušební metody
- Porovnání s jinými technologiemi
- Ekonomické náležitosti včetně ekologie
- Zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HLAVENKA, Bohumil. Manipulace s materiálem: Systémy a prostředky manipulace s materiálem. 4. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2008. 163 s. ISBN 978-80-214-3607-7.

IMAI, Masaaki. Kaizen. 1. vyd. Brno: Computer Press, a. s., 2004. 272 s. ISBN 80-251-0461-3.

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7.

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie (Advanced methods of material removal). 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 276 s. ISBN 80-7099-430-4.

MÁDL, Jan et al. Jakost obráběných povrchů. 1. vyd. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 180 s. ISBN 80-7044-639-4.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2009. 252 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu I. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-72-4283-1.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-72-4283-1.

SHAW, Milton Clayton. Metal Cutting Principles. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 651. ISBN 0-19-514206-3.

ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na využití laserového paprsku a laserových strojů ve strojírenství, především je zaměřena na oblast svařování. První část bakalářské práce se zabývá obecně laserovými stroji, jejich vývojem a principem fungování. Uvedeny jsou také druhy laserů a jejich využití. V další části je přiblížena samotná problematika laserového svařování. Popsány jsou svařovací metody, parametry vstupující do procesu a výhody/nevýhody této technologie. Obsahem následující části jsou metody zkoušení svarových spojů a posuzování výstupů těchto zkoušek. Praktická část je zaměřena na samotný proces svařování laserem včetně provedené zkoušky tahem.

Klíčová slova

laser, paprsek, svařování, materiálové zkoušky, tahová zkouška

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the usage of laser beam and laser beam machines in engineering. It will be mainly focused on laser beam welding (LBW). History of laser, its development and principal are all described in the opening part of this bachelor theses. Types of lasers and its use are also included. Next part is focused on laser welding itself. Thus, welding methods, parameters entering the process and advantages/disadvantages of this technology are introduced. The last theoretical part includes material tests of welded joint and outputs of those tests. In the experimental part the process of laser welding itself is presented and the results of tensile test are described.

Key words

laser, beam, welding, material tests, tensile test

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HANÁKOVÁ, Anna. Svařování pomocí laserových strojů [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132607>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Svařování pomocí laserových strojů vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Anna Hanáková

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Milanu Kalivodovi z VUT v Brně za cenné připomínky a rady při vypracování této bakalářské práce.

Děkuji doc. RNDr. Liboru Mrňovi Ph.D. z ÚPT v Brně a Ing. Liboru Válkovi CSc. z VUT v Brně za vstřícnost a odborné rady při zpracování experimentální části bakalářské práce.

Dále děkuji své rodině za podporu po celou dobu dosavadního studia.

OBSAH

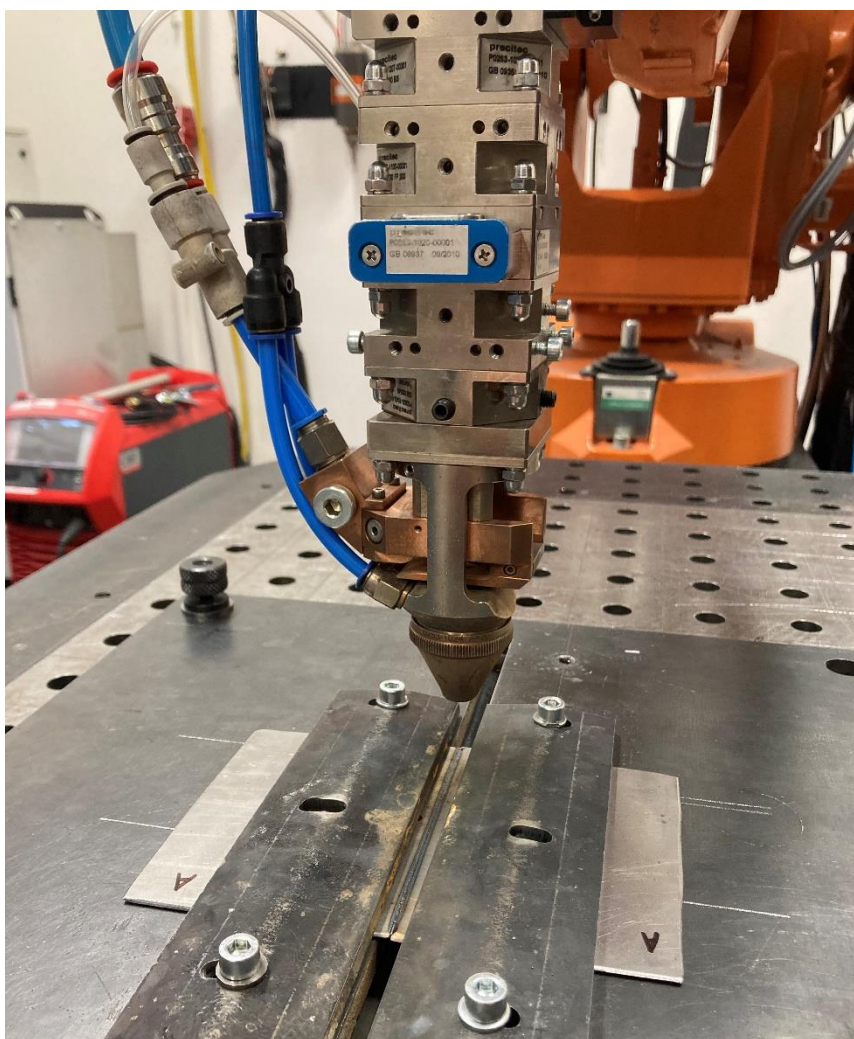
ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH	7
ÚVOD	8
1 CHARAKTERISTIKA LASEROVÝCH STROJŮ	9
1.1 Princip laseru	9
1.2 Druhy laseru.....	10
1.3 Laser ve strojírenství.....	12
2 SVAŘOVÁNÍ LASEREM.....	14
2.1 Svařování vedením tepla.....	15
2.2 Hloubkové svařování	15
2.3 Výhody a nevýhody laserového svařování	16
2.4 Moderní metody svařování laserem.....	19
3 ZKUŠEBNÍ METODY SVAROVÝCH SPOJŮ	20
3.1 Destruktivní zkoušky	20
3.1.1 Zkouška tvrdosti	20
3.1.2 Zkouška tahem	23
3.2 Nedestruktivní zkoušky	25
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	27
4.1 Příprava zkušebních vzorků.....	29
4.2 Zhodnocení provedených zkoušek	31
ZÁVĚR.....	32
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	33
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	36
SEZNAM PŘÍLOH	37

ÚVOD

Laserové technologie jsou čím dál více rozšířené a jsou široce využívány převážně v oblasti medicíny a strojírenství. Laser se od svého vynalezení v roce 1960 výrazně změnil a vyvinul. Myšlenka však zůstává stejná, laser usnadňuje práci a výrazně zdokonaluje procesy, ve kterých je použit. Ve strojírenství se využívá především k dělení materiálu a ke svařování. Co se týče svařování, jsou na kvalitu svaru neustále zvyšovány nároky, na které klasické metody nepostačují. Dalším důvodem pro rozvoj technologií jsou také nově vznikající materiály, zejména oceli, a tedy nutnost vytvořit technologie, které budou schopné je zpracovávat.

Aby mohla být kvalita svarů zaručena, musí se zkoumat jejich vlastnosti a chování při zátěži, aby se případně upravovaly svařovací parametry či typ svaru. K tomu slouží buď destruktivní, nebo nedestruktivní zkoušky svarových spojů, které se provádí před zahájením velkosériové výroby.

V této bakalářské práci se soustředím na výše zmíněné laserové svařování (obr. 0.1) a zkoušky svarů zhotovených touto metodou. Ze zkoušek se zaměřuji na zkoušky destruktivní, konkrétněji na zkoušku tahovou.



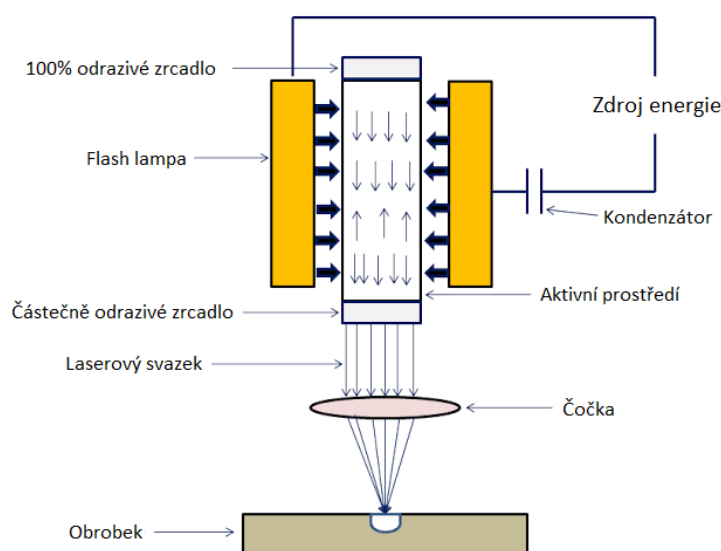
Obr. 0.1 Laserové svařování.

1 CHARAKTERISTIKA LASEROVÝCH STROJŮ

S prvotní myšlenkou stimulované emise, samotný princip laseru, přišel již Albert Einstein na začátku 20. století. První laser ale sestrojil T. H. Maiman až v roce 1960. Tento laser využíval výbojku a aktivním prostředím byl krystal rubínu. Své první využití našel laser v oblasti medicíny, když v roce 1961 byla provedena první operace oka [1].

V současné době jsou laser a laserové stroje využívány v mnoha oblastech od běžného každodenního užití až po složitější průmyslové aplikace. Velkou roli hraje v již zmíněné medicíně, především v oftalmologii pro odstraňování očních zákalů nebo dioptrií. Široké uplatnění má také v chirurgii, ortopedii, dermatologii či stomatologii. V každodenním životě je možné na laser narazit například ve formě laserové tiskárny, laserových ukazovátek, nebo čtečky čárových kódů.

Laser našel velké využití i v oblasti strojírenství. Řadí se mezi nekonvenční technologie a využívá se především k řezání, obrábění a svařování. Mezi jeho výhody patří vysoký výkon, tedy schopnost přenést velké množství energie, a přesnost, se kterou pracuje.



Obr.1.1 Schéma laserového stroje, podle [2].

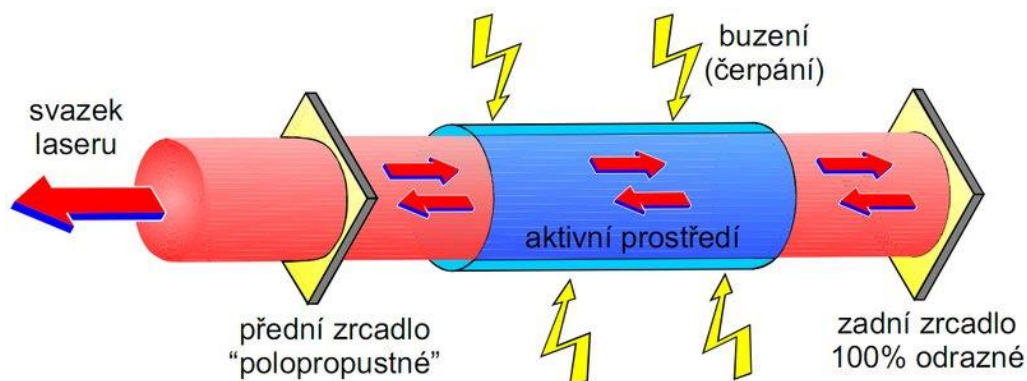
1.1 Princip laseru

Samotné slovo laser je zkratkou anglického názvu – „*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*“, což v překladu znamená zesílení světla pomocí stimulované emise záření. Laser tedy obecně označuje optický zesilovač, který generuje elektromagnetické záření pomocí procesu stimulované emise fotonů. Vše vychází ze zákonů kvantové fyziky a termodynamiky. [3]

Laser se skládá ze zdroje energie, optického rezonátoru a chlazení, které odvádí přebytečné teplo z aktivního prostředí. Součástí optického rezonátoru je aktivní prostředí, nepropustné a polopropustné zrcadlo a probíhá v něm usměrnění energie ze zdroje na laserové záření (obr. 1.2). Dodávaná energie ze zdroje, tzv. buzení, excituje elektrony atomů aktivního prostředí na stav s vyšší energetickou hladinou oproti rovnovážnému stavu. Do základního stavu se atom opět dostane při vyzáření určitého množství energie ve formě fotonu. Pro vznik laserového paprsku je zásadní stimulovaná emise fotonu, tedy emise vyvolaná vnějším podnětem. Pro start stimulované emise slouží vnější foton, který dopadne na excitovaný atom

a způsobí přechod z vyššího energetického stavu na stav s nižší energetickou hladinou za současného vyzáření dalšího fotonu. Vyzářený foton je využit ke sražení dalšího excitovaného elektronu do rovnováhy. Všechny tyto srážky probíhají pružně, to znamená, že původní foton není pohlcen. Díky zrcadlům umístěným v optickém rezonátoru dochází ke zpětnému odrazu fotonů a tím tak k dalším srážkám a exponenciálnímu růstu počtu fotonů v rezonátoru. Následně tyto fotony opouští optický rezonátor přes polopropustné zrcadlo a vytváří usměrněný laserový paprsek. [1]

Díky stimulované emisi má dopadající a emitovaný foton stejnou fázi i směr. Z toho plynou tři základní vlastnosti laseru: svazek je nerozbíhavý, monochromatický a koherentní (kapitola 2).



Obr.1.2 Schéma principu laserového stroje [3].

1.2 Druhy laseru

I když všechny lasery pracují na stejném principu, mohou se od sebe výrazně lišit jak svými vlastnostmi, tak konstrukcí. Pro rozdělení laserů jsou využívána různá kritéria, jako jsou vlnová délka vydávaného záření (infračervené lasery, lasery v oblasti viditelného světla, ultrafialové lasery a rentgenové lasery) nebo způsob čerpání energie (opticky, elektricky, chemicky, termodynamicky). Nejčastěji se však dělí podle typu aktivního prostředí na pevnolátkové, plynové a kapalinové. Mezi nejpoužívanější lasery patří převážně vláknové, Nd:YAG a CO₂ lasery (tab. 1.1).

Pevnolátkové lasery

V případě pevnolátkových laserů tvoří aktivní prostředí pevná krystalická, případně amorfní látka, dopovaná příměsí vhodných iontů. K optickému zesílení dochází právě ve zmiňovaných iontech. Nejčastěji se využívá iontů vzácných zemin, ozáření se provádí xenonovou výbojkou. Jako aktivní prostředí se často volí rubínový krystal (synteticky vyrobený) nebo sklo a obvykle se formuje do tvaru válečku [4]. Rubínový laser byl zároveň první vyrobený laser na světě. Dá se využívat jak v kontinuálním, tak v pulsním režimu (kapitola 2). Výhodou je stabilita aktivního prostředí, relativní jednoduchost konstrukce a možnost vedení výstupního svazku pomocí optických kabelů.

Polovodičové lasery

Zdrojem záření je laserová dioda, proto je někdy označován také jako diodový laser. Aktivním médiem je polovodičová struktura a řadí se proto mezi lasery pevnolátkové.

Polovodičové lasery využívají vlastností PN přechodu [5]. Jejich nevýhodou je závislost generovaného záření na teplotě.

Vláknový laser

Je to speciální typ pevnolátkových laserů, kdy krystal jako aktivní prostředí je nahrazen optickým křemíkovým vláknem. V optickém vlákně, které je dopované nejčastěji ytterbiem nebo erbiem (ze skupiny lanthanoidů), se generuje laserový paprsek a vlákno zároveň slouží jako optický zesilovač. Pro buzení jsou u vláknových laserů využívány diody, jejichž záření je přiváděno do optického vlákna. Vláknové lasery jsou jednou z nejmodernějších variant laseru a využívají se ve velké míře v průmyslu pro značení a svařování. Dosahují výkonu až 20 kW [7]. Jeho výhodami jsou vysoká účinnost (až 30 % [7]) a vysoká kvalita výstupního laserového svazku. [6]

Nd:YAG laser

Aktivní prostředí tvoří monokrystal yttrium aluminium granátu s příměsí neodymu. Většinou se využívá v pulsním režimu. Pro svařování se však využívá v režimu kontinuálním. Buzen je opticky, nejčastěji xenonovou výbojkou nebo laserovou diodou. Optický zdroj excituje atomy neodymu a ty pak emitují fotony. Vlnová délka záření je 1,064 μm a výkon těchto laserů dosahuje při pulsním režimu vysokých pulzů řádově o výkonu až stovek kW [8]. Díky své vlnové délce může být jednoduše veden křemíkovými optickými vlákny. [9]

Mezi jeho výhody patří velká energie pulsu. Nevýhodami jsou velké nároky na chlazení (především pro chlazení optických zdrojů, chlazení je prováděno vodou), vysoké provozní náklady a relativně nízká účinnost, která nabývá hodnot okolo 5 % [9]. Jedná se o nejpoužívanější typ pevnolátkového laseru a využití nachází jak v průmyslu, tak i ve vědě a medicíně.

Plynové lasery

Aktivní látkou laseru je plyn, nebo směs plynů. Často používanými jsou CO_2 , He+Ar a He+Ne. V tomto aktivním prostředí dochází k přeměně přiváděné elektrické energie ve formě výboje v dutině laseru na svazek fotonů ve formě paprsku. Jejich výhodou je, že homogenní aktivní prostředí zajišťuje výborné parametry, jako například stabilitu frekvence výstupního svazku. Plynové lasery se využívají v kontinuálním režimu.

CO_2 laser

U CO_2 laserů je aktivním prostředím směs plynů $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$. Využívají se především v průmyslu při zpracování materiálu. Jejich nejčastějším využitím je řezání (kovů i nekovů) a hloubkové svařování. CO_2 lasery se mohou značně lišit svým výkonem, ty nejvýkonnější se používají pro zpracování kovů a dosahují výkonu až 20 kW [10]. Vlnovou délku mají 10,6 μm (oblast infračerveného záření), což dokáže většina kovů absorbovat [9]. Jejich účinnost dosahuje až 20 % [10]. Buzení probíhá elektrickým výbojem. Excitovány jsou molekuly dusíku, které předávají srážkami energii oxidu uhličitému. Při návratu oxidu uhličitého na nižší energetickou hladinu jsou vyzařovány fotony a vzniká tak laserový svazek. Helium je využíváno k regulaci a ochlazování aktivního prostředí. [5]

Kapalinové lasery

Aktivním prostředím jsou nejčastěji roztoky (vodní nebo alkoholové) organických barviv. Jejich výhodou je velký rozsah vlnových délek laserového záření.

Tab. 1.1 Shrnutí parametrů vybraných druhů laserů pro průmyslovou aplikaci.

Typ laseru	Vlnová délka [μm]	Výkon [kW]	Účinnost [%]	Buzení	Aplikace
vláknový	1,070	až 20	20-30	laserové diody	gravírování, svařování
Nd:YAG	1,064	~100	3-7	laserové diody	řezání, svařování
CO ₂	10,60	až 20	10-20	elektrický výboj	řezání, gravírování

1.3 Laser ve strojírenství

Od roku 1970 byl zaznamenán velký rozvoj laserových technologií. Prvním využitím v technické praxi bylo vrtání děr pomocí pevnolátkových rubínových laserů. V současnosti nachází laser využití v mnoha odvětvích. Nejrozšířenější jsou řezání, vrtání, svařování, obrábění a povrchové úpravy. Laser je vhodný pro zpracování různých materiálů jako jsou plasty, keramika, sklo a kovy.

Jednou ze základních výhod používání laseru pro technologické procesy je možnost opracování bez přímého kontaktu nástroje s výrobkem. Dále také zpracování i těžko obrobitelných materiálů a míst obrobku, která jsou špatně přístupná.

Řezání

Řezání laserem patří k široce rozšířené metodě procesu oddělování materiálu a také se řadí mezi nejpoužívanější aplikaci výkonových laserů. Využívá se především pro řezání kovů, časté je také řezání skla a jiných materiálů. Díky vysoké koncentraci energie je možné dělit široké spektrum materiálů bez ohledu na jejich vlastnosti. Základem je laserový paprsek soustředěný do místa (bodu) řezu, který při dopadu na obrobek ohřeje materiál na teplotu varu a okolní materiál je nataven a částečně se odpařuje. Když se v místě řezu nahromadí velké množství tepla, projde paprsek skrze materiál a začne tak proces řezání. V průběhu procesu je nutné odstraňovat natavený kov a jeho páry z místa řezu. To je prováděno pomocí pracovního plynu proudícího pod vysokým tlakem. [5; 3]

Mezi výhody patří přesnost řezu, a tedy možnost řezání i složitějších obrysů. Zároveň při řezání laserem nedochází k opotřebení nástroje ani k deformaci obrobku, což je výhodou oproti konvenčním metodám.

Vrtání

Princip je podobný jako při řezání laserem. Vrtání je založeno na ohřevu materiálu na vysoké teploty a jeho následném odpařování v místě vrtání. Pomocí asistenčního plynu se odstraňují páry odpařeného materiálu a laser tak může vnikat hlouběji. Tato metoda je

využitelná pro díry okolo průměru 0,1 mm a její velkou výhodou je rychlost samotného procesu a také schopnost dostat se do pro konvenční metody špatně přístupných míst. [11]

Další způsoby obrábění

Při obrábění laserem se využívá dvou metod, kdy laser je využit jako nástroj pro ubírání materiálu. Pomocí laseru se může frézovat či soustružit. První ze zmíněných metod využívá jednoho laserového paprsku, který přivádí teplo na obrobek. Tímto teplem se materiál natavuje a pomocí pracovního plynu je přebytečný materiál z obrobku odstraňován. Druhý způsob využívá dvou různoběžných paprsků, které jsou vzájemně nakloněny pod určitým úhlem. Tímto způsobem je materiál u obrobku odřezáván.

Značení, popisování, gravírování

Laserové značení využívá podobného principu jako vrtání a řezání, a tím je odpařování materiálu. Reliéf vzniká postupným ubíráním materiálu. Materiál se odpařuje pouze z hloubky několika mikrometrů a vytváří tak jednoduché či složitější značení na povrchu. Tento způsob značení se dá využít jak pro kovy a keramiku, tak i pro dřevo nebo plasty [12].



Obr. 1.3 Laserové gravírování [12].

2 SVAŘOVÁNÍ LASEREM

Laserové svařování se na svých počátcích využívalo pouze v laboratorních podmínkách, ale po postupném vývoji a zvyšování výkonu laseru se svařování rozšířilo i do průmyslového prostředí. Postupně se také pro svařování začal nahrazovat CO₂ laser laserem pevnolátkovým (převážně vláknovým). Nejen z důvodu vyšší účinnosti pevnolátkových laserů, ale také kvůli značně jednoduššímu vedení paprsku do místa svaru.

Laserové svařování se řadí mezi tavné svařování koncentrovaným zdrojem energie. Laser jako zdroj tepla umožňuje soustředění velké energie optického záření na malou plochu. Na povrchu materiálu lze dosáhnout teploty až 100 000 °C, při které se materiál odpařuje [13].

Obecně se tato metoda vyznačuje vysokou jakostí a čistotou vytvořeného svaru. To znamená, že vytvořený svar nemusí být následně dočišťován a broušen. Dále se vyznačuje podstatně menší a užší tepelně ovlivněnou oblastí než u běžných metod a také větší hloubkou průvaru. Menší tepelně ovlivněné oblasti je docíleno vysokou rychlostí ohřevu, vysokou svařovací rychlostí a velmi vysokou hustotou výkonu na plochu. V důsledku toho se eliminuje vnitřní pnutí, následná deformace materiálu a také materiálové transformační změny [4; 14]. Zhotovený svar rychleji vychladne, což také urychluje svařovací proces. Lasery v pulzním režimu základní materiál tepelně prakticky vůbec neovlivní, svařování proběhne ve velmi krátkém čase a okolí svaru se proto nestací vůbec ohřát [13].

Svařuje se bezdotykově, bez přídavného materiálu, to znamená, že výsledný svar má stejné materiálové vlastnosti jako základní kov. Proces se dá snadno automatizovat, vykazuje se vysokou produktivitou, účinností a rychlostí práce. Díky rychlosti procesu se laser ve velké míře uplatňuje ve velkosériové výrobě. Urychlení procesu je také dáno tím, že není potřeba dokončovacích procesů (broušení) díky explicitní čistotě svarového spoje. Nevýhodou jsou však poměrně vysoké pořizovací a provozní náklady související s potřebou velkého množství energie pro svařovací proces.

Ve většině průmyslových oblastech jsou klasické metody svařování plně dostačující a není třeba je nahrazovat laserovým svařováním. Nachází ale využití v kosmickém, elektrotechnickém a automobilovém průmyslu, především tam, kde jsou na svarové spoje kladeny vysoké nároky. Lasery menších výkonů se v dnešní době využívají ve šperkařství a v oblasti umění.

Při práci s laserem je důležité dbát na bezpečnost. Kvůli odrazivosti paprsku hrozí, že se paprsek odrazí směrem k obsluhujícímu personálu a dojde k poškození očí či pokožky. Je nutné se vyvarovat zásahu záření i při nízké energii paprsku. Míra poškození závisí od výkonu laseru, délce vystavení záření atd. Důležitou roli hraje také vlnová délka. Vystavení paprsku z Nd:YAG laseru je méně nebezpečné než vystavení paprsku z CO₂ laseru z důvodu bližší vlnové délky viditelnému světlu [9]. Nutné je používat ochranné prostředky, jako jsou ochranné brýle nebo štíty a rukavice. Častá je také ochrana oddělením místa svařování kryty z organického skla.

Existují dva základní a odlišné principy laserového svařování a těmi jsou metoda vedením tepla a metoda hloubkového svařování. Použití těchto metod závisí na výkonu laseru nebo materiálových vlastnostech daného svařovaného materiálu.

2.1 Svařování vedením tepla

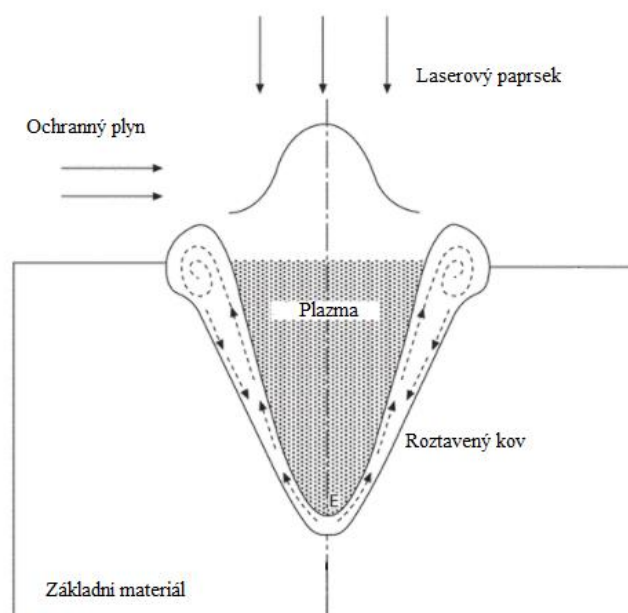
Při metodě vedením tepla neboli kondukční metodě (obr. 2.1) vzniká teplo dopadajícím laserovým paprskem a přenáší se díky tepelné vodivosti. Tato metoda umožňuje svařování do relativně malých hloubek průvarů a vzniklý svar je široký a plochý. Malá hloubka svaru je způsobena tím, že použitý laser nedosahuje dostatečného výkonu, aby pronikl materiálem, vytvořil otvor a přímo tak vytvářel kořen svaru. Teplo z dopadajícího paprsku je přenášeno nataveným materiálem na povrchu. Při svařování vedením tepla nedochází k odpařování materiálu, jako tomu je u hloubkového svařování. Pro tuto metodu se využívá laserů s větším průměrem paprsku a menším výkonem, řádově 1 kW (typicky nízkovýkonové Nd:YAG lasery) [15]. Rychlost svařování touto metodou dosahuje vyšších hodnot, využívá se tedy v případech, kdy je rychlost procesu podstatnější v porovnání s hloubkou a vzhledem svaru. Svoji aplikaci nalezne např. při svařování hliníkových slitin, kdy výsledný svar dosahuje vyšší kvality než při hloubkovém svařování. Takový svar neobsahuje vady, jako jsou póry nebo trhliny. Dále bývá tato metoda využívána při svařování rozdílných materiálů. Jako příklad může být uvedeno svařování oceli s hliníkem nebo jeho slitinami [16]. Další aplikací je také laserové svařování plastů.



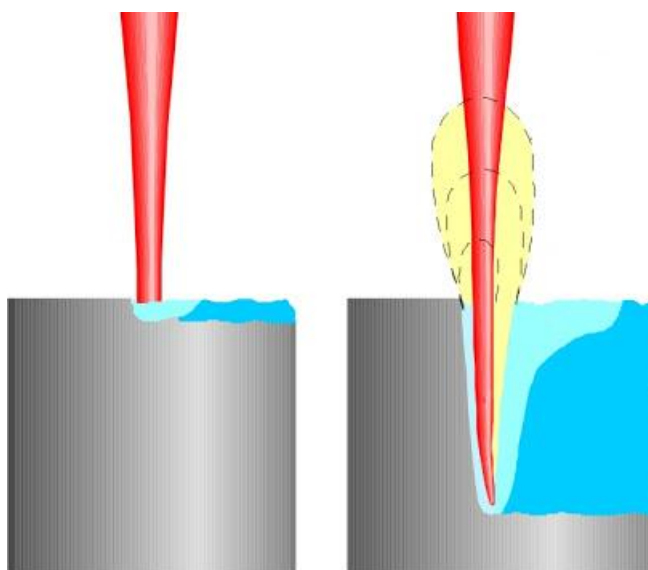
Obr. 2.1 Kondukční metoda svařování, podle [16].

2.2 Hloubkové svařování

Hloubkové svařování se jinak označuje také jako penetrační. Pro hloubkové svařování se používají převážně lasery v kontinuálním režimu při výkonech řádově v kW. Podmínkou je působení velmi vysoké plošné hustoty zaměřeného paprsku, udává se hodnota kolem $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ nebo více [9]. Na rozdíl od kondukční metody se materiál jak natavuje, tak i odpařuje. Při dopadu laserového svazku na materiál se vytváří úzká a hluboká díra, která se označuje „keyhole“ (v překladu z anglického jazyka klíčová dírka). Keyhole je v podstatě úzká kapilára vyplněná ionizovanými parami svařovaného kovu. Kolem kapiláry vzniká oblast roztaveného kovu (obr. 2.2), která při pohybu laserového svazku proudí kolem kapiláry ve směru opačném, než je pohyb svařování, postupně tuhne a vytváří tak hluboký, úzký svar.



Obr. 2.2 Hloubkové svařování, podle [16].



Obr. 2.3 Porovnání svařovacích metod (vlevo kondukční metoda, vpravo penetrační metoda) [3].

2.3 Výhody a nevýhody laserového svařování

Mezi výhody metody laserového svařování se řadí možnost vytvářet efektivní hluboké svary, což zaručuje lepší kvalitu vzniklého svarového spoje. Výhodou je lehká automatizace procesu a vysoká svařovací rychlost. Díky tomu je výsledný proces značně urychlen. Při samotném procesu se do materiálu nevnaší příliš velké množství tepla, tepelně ovlivněná oblast je tím pádem užší a základní materiál nepodléhá deformaci nebo případnému zkřehnutí. Ve většině případů se při svařování laserem nevyužívá přídavného materiálu, proces je tím usnadněn a zároveň je vylepšena kvalita a čistota svaru a jeho výsledný vzhled.

Na druhou stranu mezi nevýhody této svařovací metody patří finanční stránka spojená s pořizovacími a provozními náklady. Laserové stroje často dosahují velkých rozměrů a také jejich ovládání vyžaduje určité znalosti a obsluhující personál musí tedy těmito znalostmi disponovat. Před samotným svařováním je nutné upravovat svařované plochy. Pro realizaci kvalitních hlubokých svarů je nutné použít výkonné lasery. Tyto lasery ale mají vysokou spotřebu energie a zároveň se vykazují nižší energetickou účinností.

Vstupní svařovací parametry

Parametry jsou voleny na základě typu svařování, druhu laseru a svařovaném materiálu. Patří mezi ně:

- výkon,
- svařovací rychlost,
- vlnová délka laseru,
- vlastnosti materiálu,
- poloha ohniska,
- druh ochranného plynu.

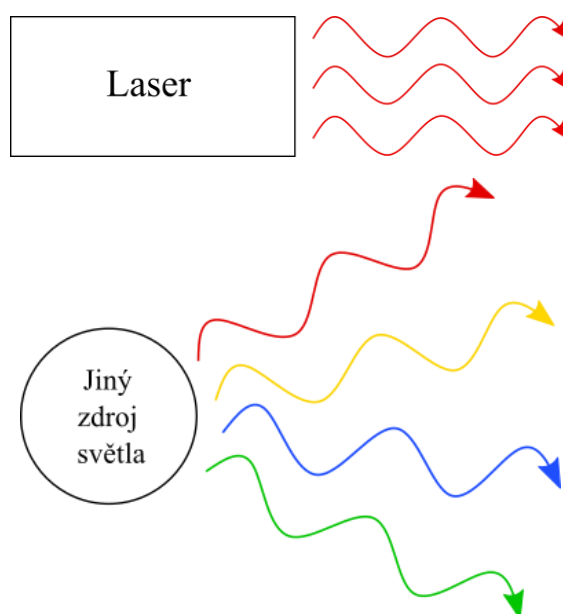
Základní parametry, kterými lze ovlivňovat jakost svaru jsou výkon a svařovací rychlost. Výkon se udává ve wattech [W] a volba jeho hodnoty závisí na tloušťce materiálu a jeho vlastnostech. Výkon určuje množství tepla (energie), které je vneseno do svařovacího procesu. Při vyšším výkonu je svar širší a tepelně ovlivněná oblast větší.

Jako svařovací rychlost se značí relativní rychlost pohybu laserové hlavy vůči svařovanému materiálu. Jelikož je svařování laserem částečně automatizovaný proces, není rychlost ručně nastavovaná v průběhu svařovacího procesu, ale nastavuje se před začátkem procesu jako konstanta. Rychlost je úměrná nastavenému výkonu, tedy i tloušťce materiálu. Podobně jako výkon, určuje svařovací rychlost množství tepla ve svařovacím procesu. Vliv je inverzní, tedy čím vyšší svařovací rychlost, tím užší svar. Udává se v jednotkách $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ [17].

Laserem je možné svařovat v okolní atmosféře nebo s přídavným asistenčním plynem. Jako i při ostatních metodách tavného svařování, slouží přídavný plyn k ochraně před oxidací svarové lázně a tuhnutího kovu. Dalšími funkcemi ochranného plynu mohou být ochrana optiky, výsledný vzhled svaru nebo zlepšení mechanických vlastností svaru. Ochranný plyn se přivádí nejčastěji souběžně s laserovým paprskem, tedy podél svařovací hlavice. Nejčastěji je využíváno helia při práci s CO_2 lasery nebo argonu při práci s vláknovými nebo Nd: YAG lasery [15; 9].

Vlastnosti laserového záření a svařovaného materiálu

Laserové záření má určité vlastnosti, kterými může být charakterizováno. Jednou z vlastností je koherentnost. Koherentní záření je záření, které má v jednom místě stejnou fázi, frekvenci i směr (obr. 2.3). Svazek laseru je také monochromatický, to znamená, že všechny vyzářené fotony mají stejnou vlnovou délku. Laserové záření má oproti klasickému viditelnému světlu malou divergenci neboli rozbíhavost, a záření je tím pádem usměrněné. Fotony se nerozbíhají a tvoří tak svazek. Tyto charakteristiky dodávají laserovému paprsku vlastnosti, díky kterým má široké spektrum využití [1].



Obr. 2.3 Schéma záření (nahore koherentní, dole nekoherentní).

Při interakci soustředěného laserového paprsku s materiálem se paprsek částečně odrazí a částečně absorbuje. Díky absorpci dochází k lokálnímu ohřevu materiálu. Materiál se ohřívá díky pohybu atomů, které se vzájemně srážejí. Kinetická energie jejich pohybu je dále přeměňována na teplo, které se díky tepelné vodivosti materiálu přenáší do okolí. Míru absorpce určují materiálové vlastnosti, kvalita povrchu a vlastnosti dopadajícího světla. Poměr odraženého a absorbovaného záření je měřítkem množství energie laseru, která může být přenesena z paprsku do materiálu. Absorpce materiálu je jedním ze základních faktorů, které ovlivňují zpracování materiálu pomocí laserových strojů [18]. Inverzní vlastností je odrazivost materiálu. Stejně jako absorpce je odrazivost závislá na typu materiálu, kvalitě jeho povrchu, vlnové délce a úhlu dopadu světla. Udává poměr množství světla, které na materiál dopadlo k množství světla, které se od materiálu odrazilo.

Kontinuální a pulzní režim svařování

Lasery mohou fungovat v kontinuálním („*Continuous Wave*“, v překladu nepřetržité vlnění) nebo pulsním režimu. Toto rozdělení určuje typ výstupního svazku. Lasery v kontinuálním režimu generují paprsek s časově neměnným výkonem, povaha záření má lineární charakteristiku [3]. Lasery v tomto režimu jsou využitelné především pro řezání a gravírování, ale také pro svařování. Při pulsním režimu jsou generovány laserové pulsy v krátkém časovém úseku, řádově v milisekundách. V těchto pulsech dosahuje paprsek maximálních hodnot energie a výkonu výstupního svazku. Pro svařování to představuje menší tepelně ovlivněnou oblast, jelikož při těchto krátkých pulzech není do materiálu vneseno takové množství tepla, aby se dále šířilo materiálem. S tím také souvisí rychlé ochlazení okolí svaru a svaru samotného po ukončení svařovacího procesu. Kromě svařování jsou pulzní lasery také ve velké míře využívány pro řezání. Pro oba zmíněné procesy je společnou výhodou možnost zpracování velmi tenkých materiálů.

Ekonomické zhodnocení

Do ekonomického hlediska laserového svařování vstupuje několik faktorů. Mezi první patří pořizovací náklady na vybavení potřebné pro proces svařování laserem. Mezi ty patří samotný laserový stroj, svařovací hlava a robotická ruka pro automatizaci. Ty se pohybují v řádu milionů korun českých a způsobují tak nedostupnost metody pro mnohé firmy. Dále jsou důležité náklady na spotřebu elektrické energie, která převyšuje množství při standardních metodách svařování kvůli velkému odběru laserového stroje. Tyto náklady jsou také závislé na druhu laseru. V současné době velmi často využívaný vláknový laser disponuje vysokou účinností při menší spotřebě elektrické energie a obecně menších provozních nákladech, pořizovací náklady jsou však vyšší. Přídavné plyny také hrají roli při posuzování ekonomické stránky. Helium vykazuje nejúčinnější ochranu svarové lázně, ale jeho nevýhodou je vysoká cena. Proto se v průmyslové praxi nejčastěji využívá směs helia a argonu, nebo čistého argonu. Servis a údržba laserového pracoviště představuje další náklady spjaté s procesem laserového svařování. Výhodou ale je využívání přímo laserového paprsku pro interakci s materiálem, a tedy nevznikají náklady na pořizování spotřebních nástrojů. Dalšími výhodami vstupujícími do ekonomického hlediska je schopnost celý proces automatizovat, a tedy zvýšit produktivitu a snížit výrobní čas. Rychlost procesu je také důležitým aspektem, který je navíc umocněn tím, že výsledné svarové spoje není nutné dále upravovat. Z těchto uvedených ekonomických aspektů vyplývá, že metoda svařování pomocí laserových strojů je využívána z převážné většiny ve velkosériové výrobě, především

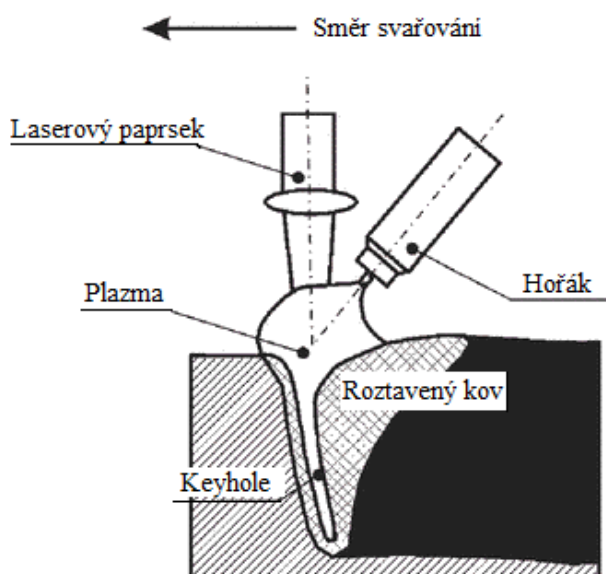
v automobilovém, elektrotechnickém a kosmickém průmyslu. [19] Detailní zhodnocení závisí na podmínkách konkrétní firmy, ve které je technologie provozována.

2.4 Moderní metody svařování laserem

Hybridní svařování

Obecně pojem hybridní svařování znamená spojení dvou metod svařování do jedné svarové lázně. Nejčastěji dochází ke kombinaci svařování laserem a některé z obloukových metod tavného svařování. Těmito metodami je myšleno například MIG/MAG svařování nebo WIG svařování. Spojením těchto metod dochází ke kombinaci jejich vlastností: laser zajišťuje vysoký výkon, rychlost procesu a také hloubku svaru a obloukové metody dodávají přídavný materiál, bez kterého by svar samotnou metodou svařování laserem nemohl vzniknout.

Jako příklad může sloužit svařování velkých plechových desek o délce až 30 metrů. Mezery mezi plechy jsou tak velké, že samotný laser by nebyl schopen tuto mezeru překlenout. Oblouková metoda tuto mezeru přemostí a vyplní ji přídavným materiálem. [20; 21]



Obr. 2.4 Schéma procesu hybridního svařování, podle [16].

Skenerové svařování

Tato metoda využívá pro pohyb laserového paprsku dvou pohyblivých, počítačem řízených zrcadel. Pohyb paprsku je určen změnami úhlů těchto zrcadel. Díky tomu se může paprsek pohybovat vysokými rychlostmi a mohou se tak vyššími rychlostmi svařovat i složitější tvary. Zvyšuje se dynamika celého procesu, která je u klasické metody brzděna setrvačností těžké svařovací hlavy. Pro zvětšení pracovního prostoru laserového paprsku se může svařovací hlava připojit na polohovací robotické rameno. Technika kombinující pohyb zrcadel a pohyb robota se nazývá „*Welding on the fly*“ (ve volném překladu svařování za běhu), v dnešní době je tato metoda často využívána. [22; 23]

3 ZKUŠEBNÍ METODY SVAROVÝCH SPOJŮ

Při procesu svařování vznikají různé vady a odchylky od požadovaného stavu. Aby mohla být zajištěna kvalita a bezpečnost svařovaných konstrukcí, je nutné analyzovat svarové spoje, jejich mechanické vlastnosti i vnitřní poruchy narušující celistvost.

Vady ve svarech se rozdělují podle polohy na povrchové (trhliny, studené spoje, póry) a vnitřní (dutiny, staženiny, vměstky).

Pro kontrolu kvality svarového spoje se používají dva způsoby: destruktivní a nedestruktivní zkoušky.

3.1 Destruktivní zkoušky

Destruktivní zkoušky zkoumají mechanické vlastnosti svarových spojů a jejich odolnost vůči vnějším vlivům, jako jsou zatížení, okolní prostředí a teplota. Zjišťuje se také struktura svaru a výskyt vad uvedených v kapitole 3. Při zkoušení dochází k porušení svarového spoje, a proto se zkoušky provádí před zahájením výroby na zkušebních vzorcích a určí se tak vhodnost vybrané metody pro svařování [24]. Zkoušky se provádí na základě platných norem (kapitola 3.1.1 a kapitola 3.1.2).

Mezi destruktivní zkoušky patří:

- zkouška tvrdosti,
- zkouška tahem,
- zkouška rázem v ohybu,
- zkouška lámavosti,
- zkouška únavové pevnosti.

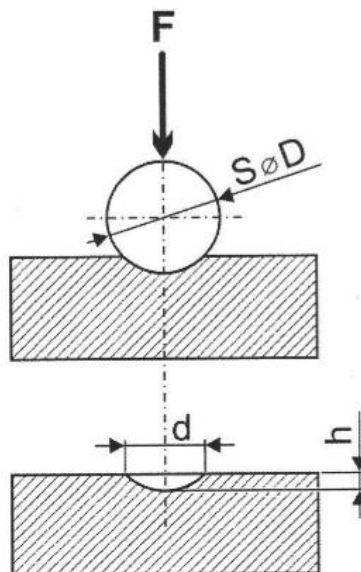
3.1.1 Zkouška tvrdosti

Princip statické zkoušky

Zkoušky tvrdosti určují tvrdost materiálu, která je definovaná jako odpor kladený materiálem proti vnikání cizího tělesa, respektive odpor vůči plastickému deformování. Obecně se zkoušky provádí vtlačováním tělíska plynule se zvětšující silou do povrchu materiálu. Při zkoušce dochází k narušování materiálu a na povrchu tělesa vzniká trvalý vtisk. Pomocí rozměrů vzniklých vtisků se dále určuje tvrdost konkrétního vzorku. Aby byly výsledky zkoušky směrodatné, nesmí se vtlačované tělísko deformovat. Bývá proto vyrobeno z materiálů s co největší tvrdostí, nejčastěji diamant, kalená ocel nebo slinutý karbid. [24; 25]

Zkouška podle Brinella

Zkouška dle Brinella je určena normou ČSN EN ISO 6506-1 [26]. Podstatou je vtlačování kuličky z karbidu wolframu, nejčastěji o průměru 10 mm, do zkušebního tělesa předepsaným zatížením, které směřuje kolmo k měřenému povrchu po dobu 10 až 15 s. Po odlehčení se měří průměr vtisku, který zůstane na povrchu, ve dvou na sebe kolmých směrech a dopočítá se jeho střední průměr (obr. 3.1). Průměr kuličky je volen z množiny 10; 5; 2,5; 1 mm. Dále jsou určeny podmínky vzdálenosti jednotlivých vtisků, vzdálenost vtisku od okraje zkušebního vzorku a jeho tloušťka. [25; 24; 26]



Obr. 3.1 Schéma zkoušky tvrdosti dle Brinella [25].

Tvrdot podle Brinella HB se určí ze vztahu:

$$HB = \frac{0,120 \cdot 2F}{A} = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (3.1)$$

kde:

D...průměr kuličky [mm],

d...střední průměr vtisku [mm],

F...zkušební zatížení [N],

Zkouška podle Vickerse

Zkouška dle Vickerse je určena normou ČSN EN ISO 6507-1 [27]. Založena je na stejném principu jako zkouška podle Brinella, ale vnikajícím tělesem je u této metody diamantový pravidelný čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou a daným vrcholovým úhlem (136°). Po odlehčení jsou měřeny dvě uhlopříčky vtisku (obr. 3.2). Podobně jako u zkoušky dle Brinella jsou normou určeny náležitosti polohy vtisku a tloušťky materiálu. [24; 27]

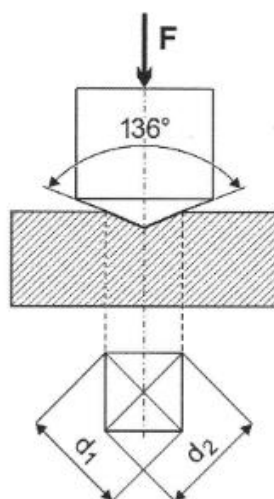
Tvrdot podle Vickerse HV se určí ze vztahu:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}, \quad (3.2)$$

kde:

F...zkušební zatížení [N],

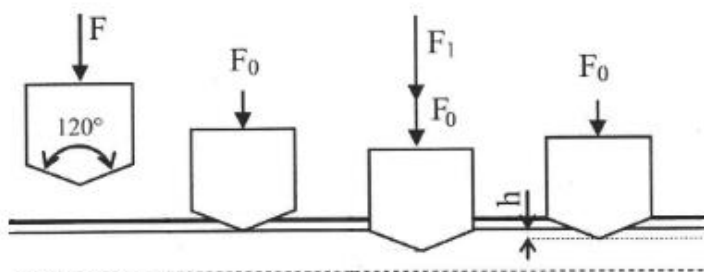
d...aritmetický průměr dvou délek uhlopříček [mm].



Obr. 3.2 Schéma zkoušky tvrdosti dle Vickerse [25].

Zkouška podle Rockwella

Zkouška dle Rockwella je určena normou ČSN EN ISO 6508-1 [28]. Principem se částečně liší od zkoušek podle Brinella nebo Vickerse. Podstata spočívá ve vtlačování tělesa, jímž je buď diamantový kužel, ocelová kulička nebo kulička ze slinutého karbidu. Těleso se vtlačuje ve dvou krocích. V prvním kroku je zatěžováno předběžným zatížením. Dále se přidá přídatné zatížení a po jeho odstranění se měří trvalá hloubka vtisku „h“ (obr. 3.3). [25; 24]



Obr. 3.3 Schéma průběhu zkoušky tvrdosti dle Rockwella, podle [25].

Zkouška mikrotvrdosti svarových spojů

Zkouška tvrdosti svarových spojů se obvykle provádí metodou podle Vickerse dle normy ČSN EN ISO 9015-1 [29]. Jejím cílem je určit místa v příčném řezu svarového spoje se sníženou tvrdostí, která vznikla při procesu svařování materiálu [29].

Před samotnou zkouškou se vytváří zkušební vzorek, který musí splňovat dané požadavky normy ČSN EN ISO 6507-1 [27]. Vzorek musí obsahovat tepelně neovlivněný základní materiál, tepelně ovlivněnou oblast a přídatný materiál, pokud je využit. Povrch vzorku se dále připravuje broušením a leptáním, aby byly zřetelné jednotlivé oblasti svarového spoje. Tvrdost zkušebního vzorku nesmí být ovlivněna dělením a přípravou vzorku. Dále musí být splněny náležitosti jako při zkoušce tvrdosti základního materiálu, což je tloušťka materiálu a vzdálenosti mezi vtisky. Zkouška se provádí řadou vtisků. [24; 29]

3.1.2 Zkouška tahem

Zkouška tahem je jednou ze základních mechanických zkoušek pro hodnocení pevnosti a plastických vlastností materiálu nebo spojů. Je předepsána normou ČSN EN ISO 6892-1 [30]. Tato norma určuje podmínky pro provedení tahové zkoušky. Vlastní zkouška spočívá v deformaci zkušebního tělesa tahovým zatížením, obvykle do lomu, za účelem stanovení mechanických vlastností. [31; 30]

Princip zkoušky

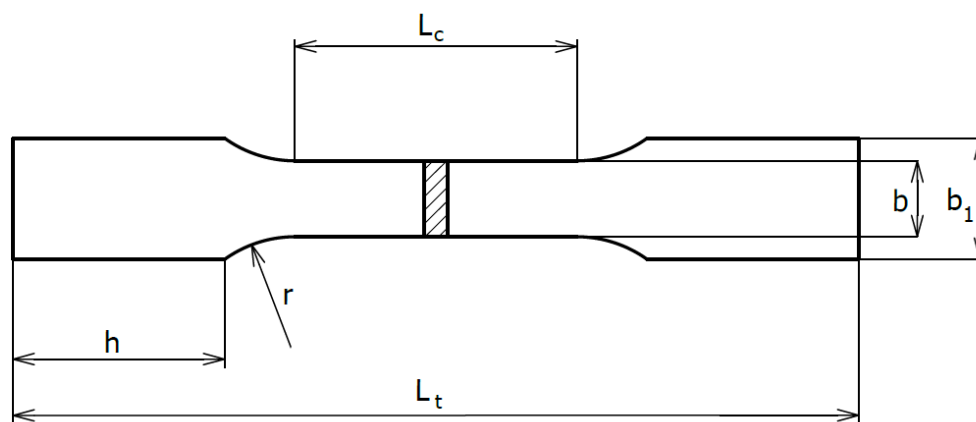
Princip spočívá v zatěžování normalizované tyče kruhového nebo obdélníkového průřezu, s rozměry stanovenými normou. Tyč se po upnutí do zkušebního (trhacího) stroje zatěhuje plynule rostoucí silou a zkoumá se její deformace. Provádí se nejčastěji za pokojové teploty, pokud není stanoveno jinak. Dochází k jednoosému zatěžování a tyč se prodlužuje z původní délky na konečnou při současné změně příčného průřezu, obvykle až do jejího přetržení.

Zkouška dává do poměru zátěžnou sílu a tomu odpovídající deformaci, respektive prodloužení. Na základě těchto výstupů lze vykreslit graf závislosti neboli tahový diagram (obr. 3.5). Lineární průběh v tomto diagramu odpovídá oblasti pružné deformace, po překročení této oblasti se materiál deformuje trvale [25].

Zkušební vzorky

Pro oddělování zkušebních tyčí ze svarového spoje se využívají mechanické nebo tepelné metody dělení materiálu. Tyto metody nesmí ovlivnit vlastnosti zkušební vzorku. Týká se to především tepelných metod oddělování materiálu, při kterých může dojít ke vzniku tepelně ovlivněné oblasti a vlastnosti svaru by tak mohly být změněny.

Podle způsobu přípravy zkušebních tyčí se tahová zkouška svarových spojů dělí na příčnou a podélnou. Příčná zkouška se využívá pro určení meze pevnosti svarových spojů. Zkušební vzorky se odebírají příčně tak, aby po opracování na zkušební tyč zůstala osa svarového kovu ve středu zkoušené délky tyče. Tloušťka tyče musí být stejná jako tloušťka základního materiálu. [31] Rozměry zkušební tyče (obr. 3.4) se stanovují podle normy ČSN EN ISO 4136 [32].



Obr. 3.4 Zkušební vzorek pro příčnou zkoušku tahem (h -upínací délka, b_1 -šířka hlavy upínacího konce, b -funkční šířka, L_c -funkční délka, L_t -celková délka, r -poloměr podpěr).

Vyhodnocení zkoušky

Z grafu závislosti napětí na deformaci při zkoušce tahem je možno stanovit následující veličiny [30; 25]:

- mez kluzu: nejmenší napětí, při němž dochází k nárůstu plastické deformace, aniž by stoupala zatěžující síla

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{MPa}], \quad (3.3)$$

kde:

F_e ...zatížení na mezi kluzu [N],

S_0 ...výchozí příčný průřez tyče [mm^2],

- smluvní mez kluzu: napětí, při kterém prodloužení dosáhne předepsané hodnoty vyjádřené v procentech počáteční měřené délky, nejčastěji 0,2 %

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [\text{MPa}], \quad (3.4)$$

kde:

$F_{p0,2}$...smluvní zatížení [N],

- pevnost v tahu: napětí odpovídající nejvyšší hodnotě zátěžné síly před přetržením, po překročení této hodnoty dochází k poklesu křivky tahového diagramu až do okamžiku porušení celistvosti zkušebního vzorku

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad [\text{MPa}], \quad (3.5)$$

kde:

F_{\max} ... největší hodnota tahové síly, maximální zatížení [N],

- tažnost: je měřítkem tvárnosti, hodnota „A“ odpovídá trvalému prodloužení, vyjadřuje se v procentech původní délky

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%], \quad (3.6)$$

kde:

L_u ... délka tyče po přetržení [mm],

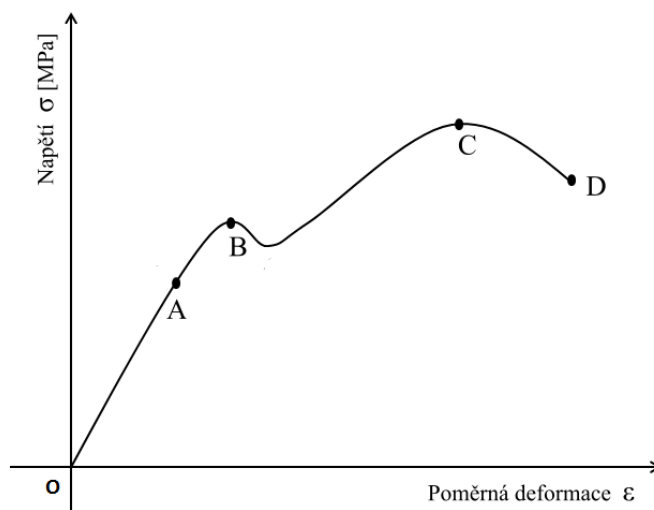
L_0 ... počáteční délka tyče [mm],

- kontrakci: je nejvýraznější změna průřezu vzhledem k průřezu původnímu, vyjadřuje se v procentech počáteční průřezové plochy

$$Z = \frac{S_u - S_0}{S_0} \cdot 100 \quad [\%], \quad (3.7)$$

kde:

S_u ... průřez krčku tyče po přetržení [mm].



Obr. 3.5 Tahový diagram, podle [33].

Body vyznačené v diagram (obr. 3.5) jsou:

- bod A: do tohoto bodu se zkušební tyč deformuje přímo úměrně zatěžující síle,
- bod B: mez kluzu,
- bod C: mez pevnosti v tahu,
- bod D: při této hodnotě napětí dochází k přetržení tyče.

Pro svarové spoje je příčná zkouška tahem specifikována normou ČSN EN ISO 4136 [32]. Tato norma určuje podmínky pro provedení této zkoušky, jako jsou rozměry zkušebního vzorku a postup zkoušky. Zkouška se provádí za pokojové teploty (mezi 10 °C a 35 °C).

Výše uvedené charakteristiky se při zkoušce tahem určují u základních materiálů. U zkoušení tahem svarových spojů se převážně určuje pouze mez pevnosti daného svaru. Další zjištěné charakteristiky jsou pouze orientační.

3.2 Nedestruktivní zkoušky

Jsou to takové zkoušky, při kterých nedochází k porušení zkoumaného svarového spoje. Nedestruktivní metody svarových spojů se dělí podle toho, jestli se pomocí nich identifikují vady povrchové nebo vnitřní (Příloha 1). Mezi povrchové vady se řadí například trhliny, póry, neprovařený kořen a identifikují se nejčastěji pomocí vizuální nebo penetrační metody. Vnitřní vady jsou staženiny, vměstky, plynové dutiny atd. Nedestruktivní metody svarových spojů, které identifikují tento druh vad jsou zkoušky ultrazvukové a radiologické.

Vizuální kontrola

Vizuální kontrola je nejjednodušší z nedestruktivních zkoušek, která identifikuje zjevné vady svaru. Ve většině případů se nevyužívá samostatně, ale předchází dalším zkouškám, které budou na daném zkušebním vzorku prováděny. Vizuální kontrola může být přímá, to

znamená, že kontrola je prováděna pouhým okem, nebo nepřímá. U nepřímé metody jsou využívány optoelektronické přístroje jako je např.: endoskop. [34]

Penetrační zkoušky

Penetrační neboli kapilární metody určují vady, které jsou na povrchu svaru otevřené a může do nich tak vtéci kapalina. To je samotným principem zkoušky. Využívají se kapilárně aktivní kapaliny, které mají malé povrchové napětí, dobrou smáčivost a snadno se dostanou do povrchových vad. Povrch zkušební vzorku se touto kapalinou potře, odstraní se její přebytek z povrchu a kapalina, která vtekla do trhlin vlivem kapilárního jevu, vzlíná. Tímto způsobem se tedy odhalí vady, jejich tvar a rozměry. [31; 34]

Ultrazvukové zkoušky

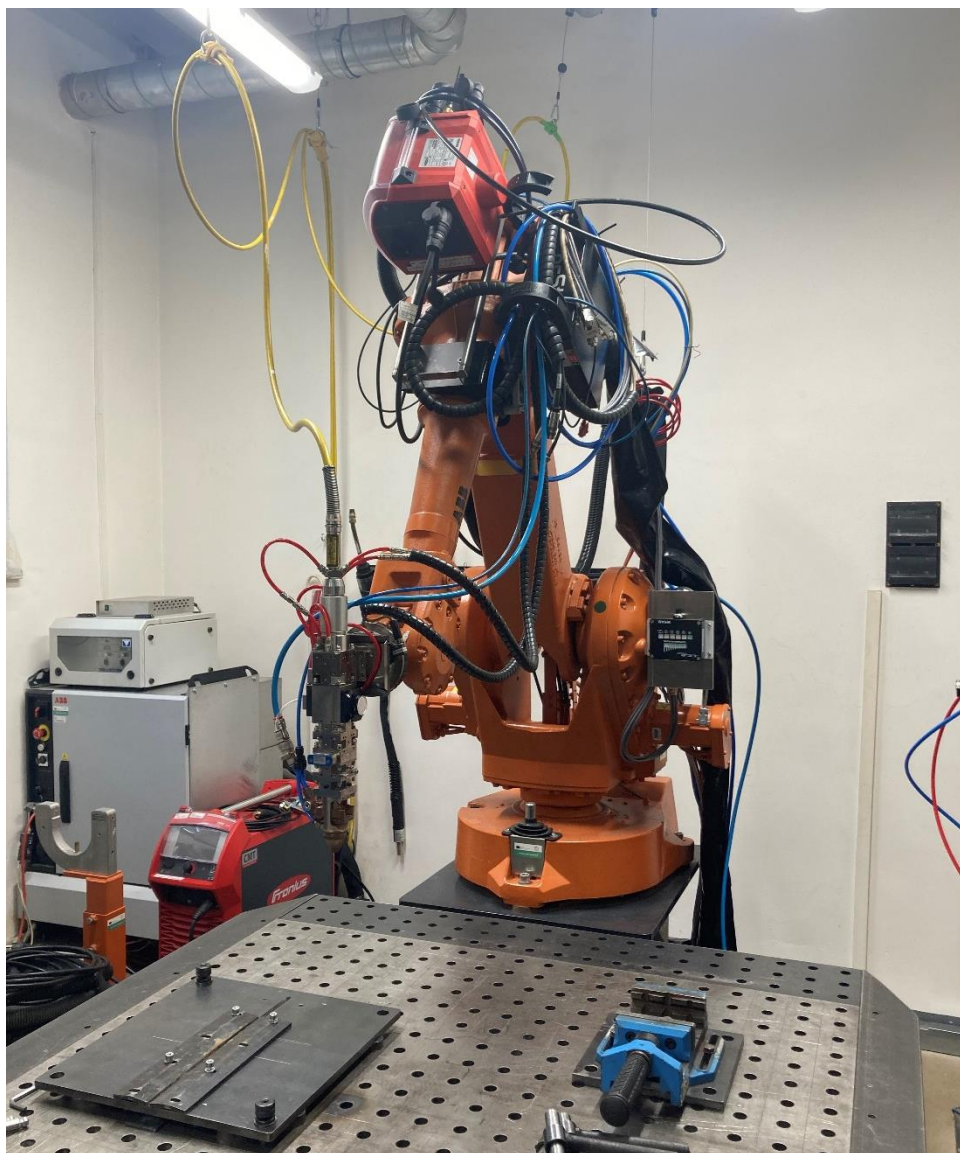
Ultrazvukové zkoušky jsou založeny na průchodu akustického vlnění zkušebním vzorkem a jeho vlastnostmi při interakci s vadami. Ultrazvukové zkoušky se rozdělují na průchodové nebo odrazové. Při průchodové metodě se vzorek umísťuje mezi dvě sondy (vysílač a přijímač). Při interakci vlnění s vadou se vlnění částečně odráží a přijímač zaznamená menší množství dopadené energie. U odrazové metody se do materiálu vysílají krátké ultrazvukové impulzy, které se odráží na povrchu materiálu a vad. Signál se po průchodu vrací do sondy a na základě časového průběhu se určuje přítomnost vnitřních vad. [34]

Radiologické zkoušky

Označované také jako zkoušky pronikavým zářením identifikují vady svarů prozařováním. Princip spočívá v interakci elektromagnetického záření s materiálem a následném zviditelnění prošlého záření. V místech, kde se nachází vady, je záření absorbováno jinak než v základním materiálu bez vad. Tato místa jsou pak viditelná na detektoru a je tak možné určit rozměry a tvar vad. Pro radiologickou kontrolu kovových materiálů se nejčastěji využívá rentgenového nebo gama záření. [31]

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část bakalářské práce se věnuje přímo procesu svařování pomocí laserového stroje a následné mechanické zkoušce svarových spojů. Svařování bylo provedeno na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Použit byl vláknový laser YLS-2000 od firmy IPG Photonics (obr. 4.1) s maximálním výkonem 2000 W (Příloha 2). Vlnová délka tohoto laseru je 1,07 μm . Pro svařování bylo využito hlavy Precitec YW30. Ochrana svaru byla zajištěna přívodem inertního plynu, v tomto případě argonu. Svařovací hlava byla připojena na robotické rameno IRB 2400 od firmy ABB s.r.o.

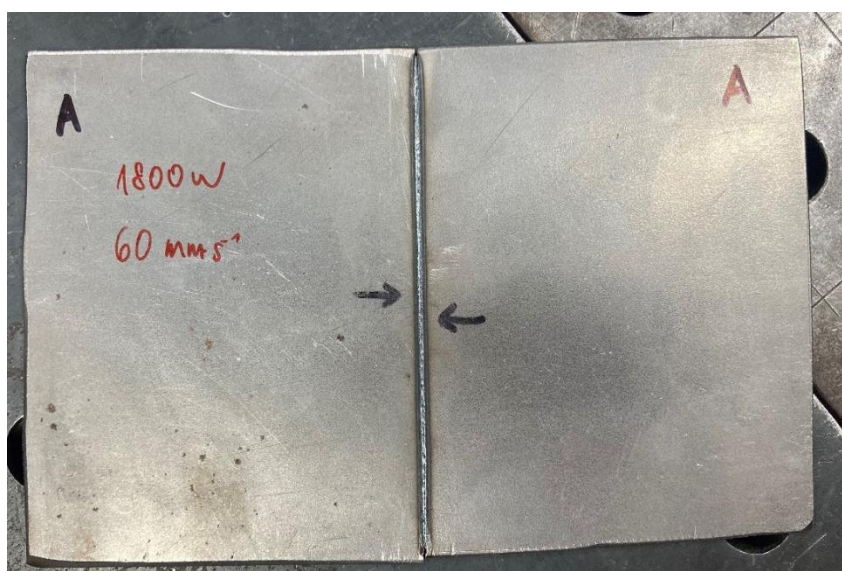


Obr. 4.1 Laserový stroj na Ústavu přístrojové techniky.

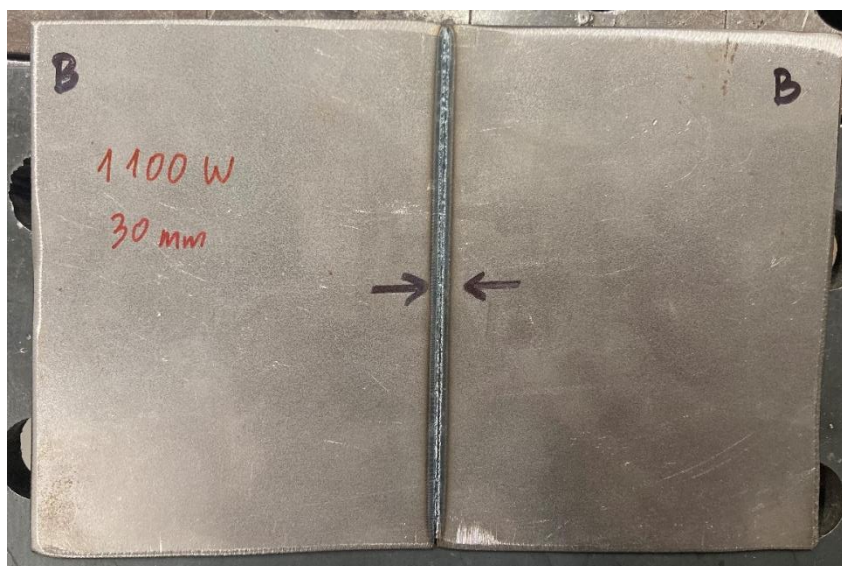
Svařeny byly dva vzorky různými parametry. První dva menší kusy plechu (80×100 mm) byly svařeny vyšší svařovací rychlostí a vyšším laserovým výkonem, druhá dvojice byla svařena nižší rychlostí a nižším výkonem (tab. 4.1).

Tab. 4.1 Svařovací parametry svařených vzorků

Označení vzorku	Svařovací rychlost	Výkon laseru
A	$60 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	1800 W
B	$30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$	1100 W

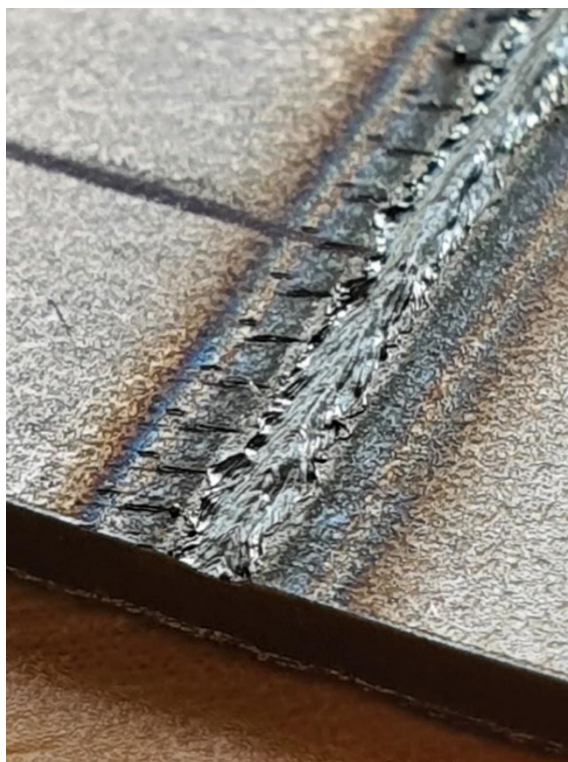


Obr. 4.2 Svařený vzorek „A“.



Obr. 4.3 Svařený vzorek „B“.

Jedná se o ocel ČSN 11 321 (ekvivalentní označení 1.0330) o tloušťce 1,5 mm. Délka každého z obou zhotovených svarů byla 100 mm.

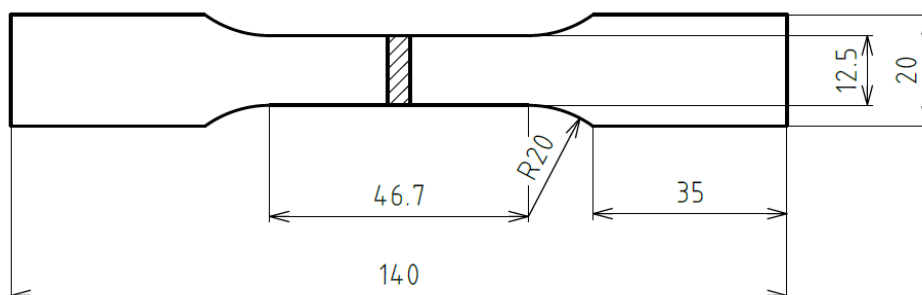


Obr. 4.4 Detail zhotoveného svaru.

Z detailu svaru (obr. 4.4) je zřetelně viditelná tepelně ovlivněná oblast (dále jen TOO). Obecně je TOO u laserového svařování užší, což má příznivý vliv na vnitřní pnutí, a díky tomu nedochází ke vzniku prasklin, trhlin a jiných vad s tímto spojených. Úzká TOO je způsobena tím, že se při procesu svařování vnese do materiálu podstatně méně tepla než například při obloukových metodách svařování. V základním materiálu tak nedochází ke zkřehnutí nebo deformaci a obecně se vykazuje lepšími pevnostními vlastnostmi.

4.1 Příprava zkušebních vzorků

Po svaření vzorků následovala samotná tahová zkouška. Ze svařených kusů plechu byly vyřezány 4 zkušební vzorky pomocí laserové technologie. Tyto vzorky byly následně upraveny tak, aby jejich tvar odpovídal normě DIN 50125 [35], typ tělesa H (tato norma byla zvolena na základě informací z Ústavu materiálových věd a inženýrství, kde také byla zkouška tahem prováděna [36]). Rozměry vzorku byly voleny tak, aby odpovídaly požadavkům pro upevnění do trhačího stroje, tedy aby byla dodržena minimální hodnota rozměru „h“ (kapitola 3.1.2). Rozměr „ L_c “ byl upraven, respektive zkrácen, z minimální hodnoty dle normy (obr. 4.6).



Obr. 4.5 Použité rozměry vzorku pro tahovou zkoušku.

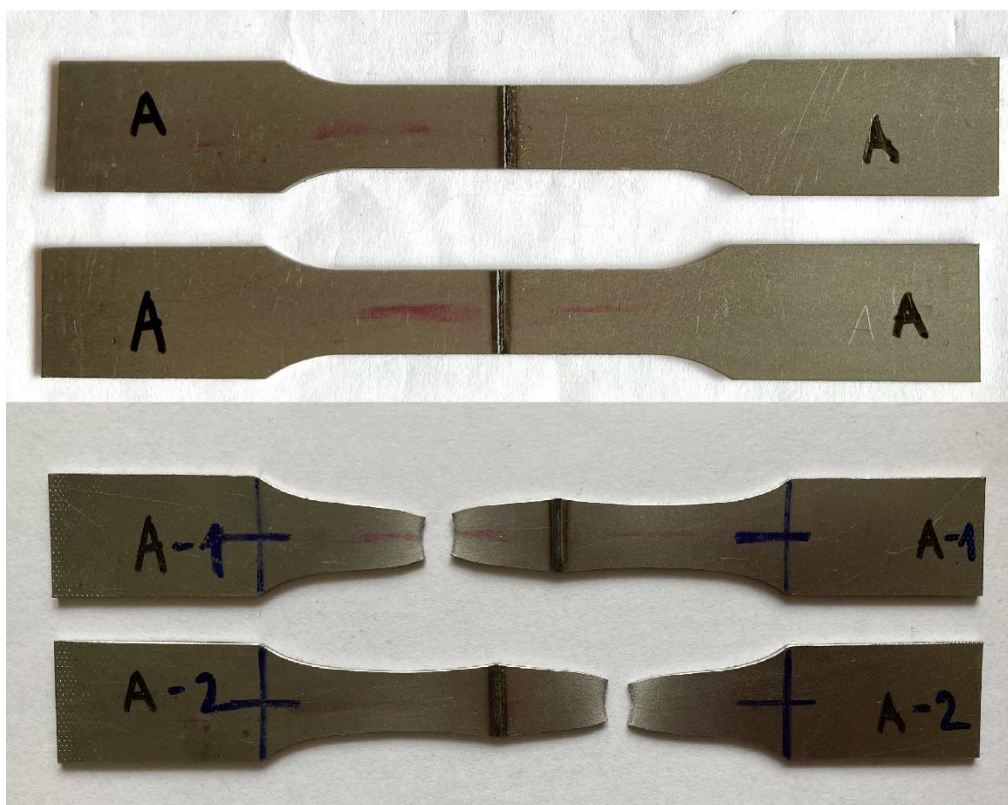


Obr. 4.6 Ukázka vzorku „A“.

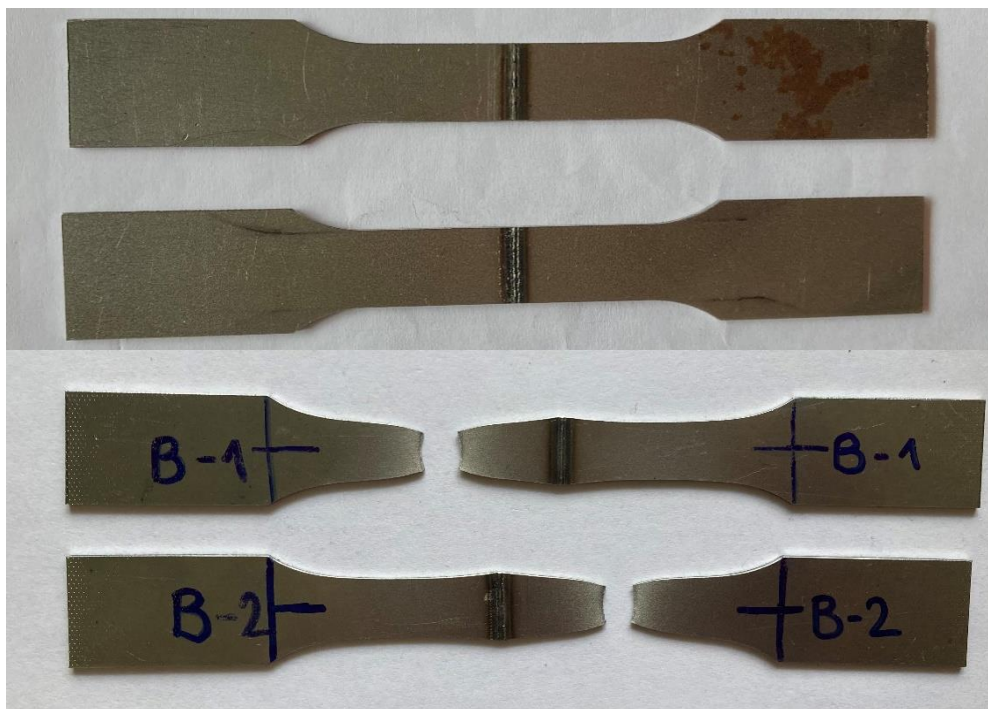


Obr. 4.7 Ukázka vzorku „B“.

Tahová zkouška byla uskutečněna na Ústavu materiálových věd a inženýrství. Pro realizaci tahové zkoušky byl použit stroj Zwick/Roell Z250 Allround-line, na kterém byl nainstalovaný siloměr 150 kN. Záznam deformace byl zajištěn snímačem MultiXtens. Zkouška byla provedena byla za pokojové teploty.



Obr. 4.8 Vzorky „A“ (nahore před a dole po tahové zkoušce).



Obr. 4.9 Vzorky „B“ (nahore před a dole po tahové zkoušce).

4.2 Zhodnocení provedených zkoušek

Při tahové zkoušce svarových spojů se vyhodnocuje především mez pevnosti v tahu. Ostatní veličiny jsou pouze orientační. Předpokladem pro určení meze pevnosti je přetržení vzorku ve svaru. Ve většině případů se však zkušební vzorek přetrhne v základním materiálu. Aby došlo k lomu ve svaru, musel by svar obsahovat trhliny, praskliny, vměstky, nebo jiné vady.

Tahová zkouška probíhala za pokojové teploty. Po upnutí do trhacího stroje byly vzorky postupně zatěžovány plynule se zvětšující silou až do jejich přetržení. V případě této zkoušky došlo u všech vzorků k lomu v základním materiálu (obr. 4.8 a obr. 4.9).

Tím je ukázáno, že svary neobsahují závažné vady, které by ovlivňovali jejich kvalitu. Aby však byly výsledky tahové zkoušky průkazné a mohly být použity například pro posouzení toho, jestli je metoda svařování vhodná pro konkrétní výrobu, muselo by být zkoušek provedeno více. Výstupem tahové zkoušky je vždy protokol (Příloha 3), který musí splňovat normou dané požadavky.

ZÁVĚR

Laserové technologie se ve velké míře využívají v oblasti strojírenství a svůj význam mají také v oblasti spojování materiálu. Svařování laserem se využívá čím dál častěji, i když kvůli stále vysokým finančním nákladům není technologie dostupná řadě menších podniků a využívána je především ve velkosériové výrobě, jako například v automobilovém průmyslu.

V rešeršní části této bakalářské práce byly laserové technologie přiblíženy jak z pohledu obecného využití ve strojírenství, tak především právě z pohledu zmíněné technologie laserového svařování. Konkrétněji byl popsán samotný princip procesu a jeho parametry, ale také jeho vývoj a modernizace. Další teoretickou částí byl popis zkušebních metod, kterými se ověřují mechanické vlastnosti základního materiálu a svarových spojů. Tyto zkoušky jsou podstatné z důvodu kontroly svarových spojů, a tedy hodnocení jejich kvality.

Experimentální část se skládala ze samotného svaření vzorků pomocí laserového stroje, jejich následném obrobení na tvar požadovaný normou a provedení příčné tahové zkoušky. Při této zkoušce došlo k přetržení zkušebního vzorku v základním materiálu, a tak zjištěná hodnota meze pevnosti v tahu může sloužit spíš jako orientační. Tyto výsledky však ukazují, že ve svarovém spoji nedošlo ke vzniku žádných závažných vad. Výsledky experimentální části, pozorování samotného procesu a získané teoretické znalosti vedou k tomu, že tato metoda dosahuje vysoké kvality svarového spoje a má do budoucna velký potenciál značně širšího průmyslového využití.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Czech Lasers: Vzdělávací web o laseru* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://czechlasers.cz/studovna/historie-laseru-ve-svete/>
- [2] *Mechanical Walkins: Laser Beam Machining – Principle, Working, Advantages and Disadvantages* [online]. In: . [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <http://www.mechanicalwalkins.com/laser-beam-machining-principle-working-advantages-and-disadvantages/>
- [3] Seriál na téma lasery. *LAO-lasery a optika* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/?stitek=101>
- [4] KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 2000. ISBN 80-7082-697-5. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:bfffea80-de75-11e8-a5a4-005056827e52?page=uuid:a79b72a0-f7f9-11e8-bc37-005056827e51>
- [5] KUBÍČEK, Jaroslav. *Speciální metody tavného svařování, tlakové svařování* [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory>
- [6] *Leonardo technology: Automatizace průmyslového značení* [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
- [7] *Leonardo technologyaaaa: Princip vláknového - FIBER LASERU* [online]. [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
- [8] *Leonardo technologyND: Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064 nm Infra red* [online]. [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
- [9] *Recommended Practices for Laser Beam Welding, Cutting, and Allied Processes*. 2nd Edition. the United States of America, Miami: American Welding Society (AWS), 2010. ISBN 978-0-87171-777-1. Dostupné také z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpRPLBWCA2/viewerType:toc//root_slug:recommended-practices/url_slug:laser-systems?issue_id=kt010QN2Q8&hierarchy=
- [10] *Leonardo technology: Princip CO2 laseru* [online]. [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru>
- [11] Lintech. *Lintech: Vrtání laserem* [online]. [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-aplikace/laserove-vrtani>
- [12] TRUMPF. *TRUMPF* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/laserove-oznacovani/gravirovani-laserem/
- [13] LIDMILA, Zdeněk a Emil SVOBODA. *Strojírenská technologie*. Brno: Univerzita obrany, 2006. ISBN 978-80-7231-220-7. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:828365e0-7482-11e8-9690-005056827e51>
- [14] KUBÍČEK, Jaroslav. *Speciální metody tavného svařování* [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory>
- [15] KMEC, Ján, Daniel KUČERKA a Soňa RUSNÁKOVÁ. *Strojírenské technologie II*. České Budějovice: Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích, 2015. ISBN 978-80-7468-081-6. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:4b15ecd0-e11f-4755-97f7-8340b636af6e>

-
- [16] KATAYAMA, Seiji, ed. *Hand Book of Laser Welding Technologies*. Woodhead Publishing, 2013. ISBN 978-0-85709-264-9. Dostupné také z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpHLWT0001/viewerType:toc//root_slug:handbook-laser-welding/url_slug:handbook-laser-welding?b-q=laser%20welding&include_synonyms=no&q=laser%20welding%20&sort_on=default
- [17] TANG, Herman. *Automotive Vehicle Assembly Processes and Operation Management*. Warrendale, Pennsylvania, USA: SAE International, 2017. ISBN 978-0-7680-8338-5. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpAVAPOM01/cid:kt011VW881/viewerType:khtml/?page=last&b-q=laser%20beam%20welding&view=collapsed&zoom=1>
- [18] *3D Printing Breakthroughs in Research and Practice: Breakthroughs in Research and Practice*. Information Resources Management Association, 2016. ISBN 9781522516774. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011E3KY4/printing-breakthroughs/laser-material-interactions>
- [19] *KONSTRUKCE: Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. 2006 [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/laserove-svarovani-ekonomika-a-kvalita/>
- [20] *TRUMPF: Hybridní svařování* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/hybridni-svarovani/
- [21] MRŇA, Libor. *MM Průmyslové spektrum: Aktuální možnosti v laserovém svařování* [online]. [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aktualni-moznosti-v-laserovem-svarovani.html>
- [22] MRŇA, Libor. Aktuální možnosti v laserovém svařování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aktualni-moznosti-v-laserovem-svarovani>
- [23] Skenerové svařování. *TRUMPF* [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/skenerove-svarovani/
- [24] PODHORA, Jiří. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. Brno: TDS Brno - SMS, 2005. ISBN 80-903386-4-X. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:d2183370-0a46-11e8-a0cf-005056827e52>
- [25] ČIŽMÁROVÁ, Elena, Jakub HORNÍK, Zdeňka JENÍKOVÁ a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.* Praha: České Vysoké Učení Technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2. Dostupné také z: <https://kramerius-vs.techlib.cz/view/uuid:3afc80-7e30-11e5-a837-0800200c9a66?page=uuid:c2c37ade-82f4-11e5-a9b3-001b63bd97ba>
- [26] ČSN EN ISO 6506-1. *Kovové materiály-Zkouška tvrdosti podle Brinella: Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [27] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály-Zkouška tvrdosti podle Vickerse: Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [28] ČSN EN ISO 6508-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Rockwella: Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

-
- [29] ČSN EN ISO 9015-2. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkoušení tvrdosti- Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [30] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály-Zkoušení tahem: Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [31] KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. *Svařování I*. Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0870-6. Dostupné také z: <https://kramerius-vs.techlib.cz/view/uuid:4ad7d48b-1d5b-489a-bc69-40349f012271?page=uuid:8f8bd4a1-dcf9-4095-a4f8-21bcce5015a2>
- [32] ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Příčná zkouška tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [33] Stress Strain Curve – Relationship, Diagram and Explanation. In: *Mechanical Booster* [online]. [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://www.mechanicalbooster.com/2016/09/stress-strain-curve-relationship-diagram-explanation.html>
- [34] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-720-4283-1. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:d1d1a850-fd1c-11e8-bc37-005056827e51?page=uuid:50db5640-038b-11e9-95ba-5ef3fc9bb22f>
- [35] DIN 50125. *Testing of metallic materials: Tensile test pieces*. Německo: Deutsches Institut für Normung E.V. (DIN), 2016.
- [36] VÁLKA, Libor. *Odborný asistent VUT [ústní sdělení]*. Brno, 12.4. 2021.
- [37] *K-TIG: K-TIG Vs Hybrid Laser Beam Welding* [online]. In: . [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.k-tig.com/how-does-k-tig-compare-to-hybrid-laser-beam-welding-hlbw>
- [38] *Česká svářečská společnost ANB: Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení* [online]. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384&z=2>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Význam
A	[%]	Tažnost
b_0	[mm]	Počáteční šířka zkoušené délky
b_1	[mm]	Šířka hlavy upínacího konce
D	[mm]	Průměr kuličky
d	[mm]	Střední průměr vtisku
F	[N]	Zkušební zatížení
F_e	[N]	Zatížení na mezi kluzu
F_{\max}	[N]	Maximální zatížení
$F_{p0,2}$	[N]	Smluvní zatížení
h	[mm]	Délka rozšíření pro upnutí do stroje
L_0	[mm]	Počáteční délka tyče
L_u	[mm]	Délka tyče po přetržení
L_c	[mm]	Funkční délka
L_t	[mm]	Celková délka vzorku
R_e	[MPa]	Mez kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
r	[mm]	Poloměr podpěr
S_0	[mm ²]	Výchozí průřez tyče
S_u	[mm ²]	Průřez tyče po přetržení
Z	[%]	Kontrakce

Zkratka	Popis
Ar	argon
CO ₂	oxid uhličitý
He	helium
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
Nd	neodym
N ₂	dusík
WIG	Wolfram Inert Gas
YAG	yttrium aluminium granát

SEZNAM PŘÍLOH

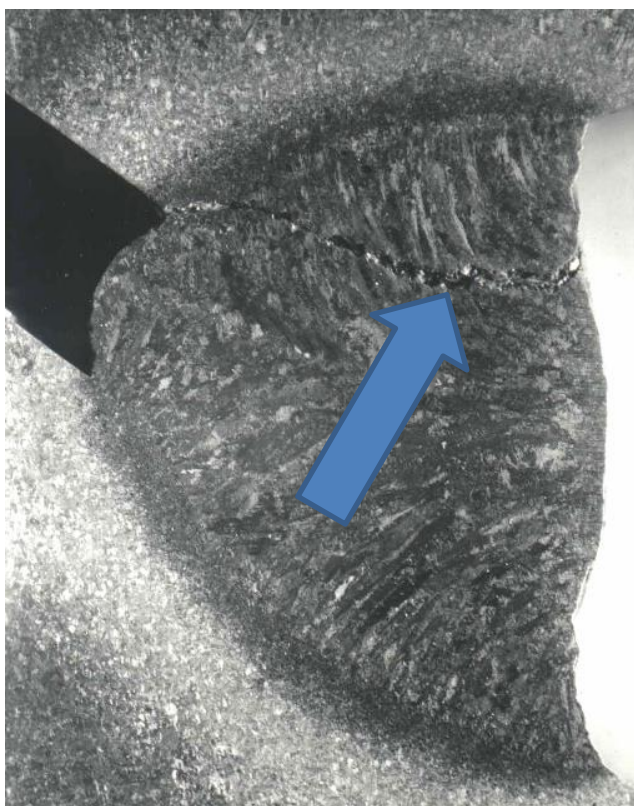
Příloha 1: Ukázky snímků při nedestruktivních zkouškách

Příloha 2: Laserový stroj a jeho parametry

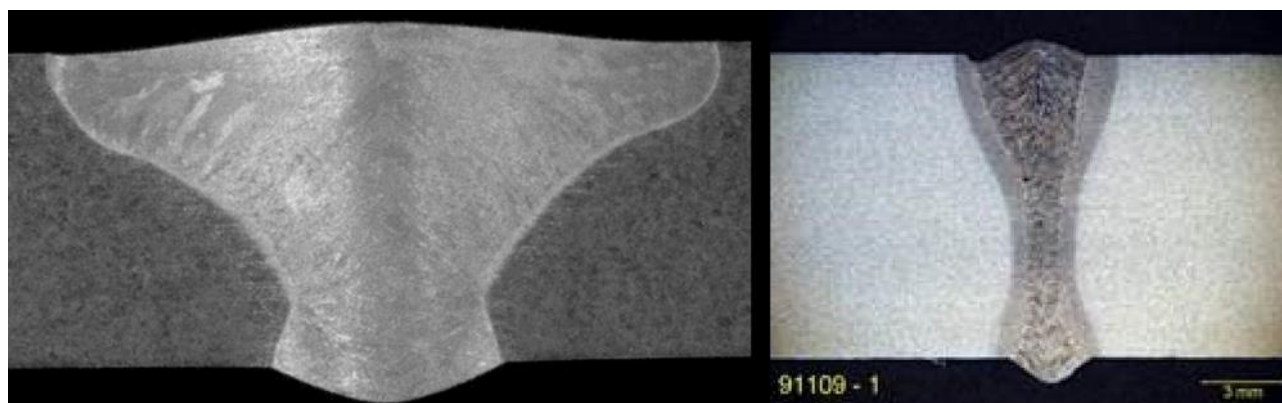
Příloha 3: Tahové diagramy zkušebních vzorků

PŘÍLOHA 1

Ukázky snímků při nedestruktivních zkouškách [37; 38]



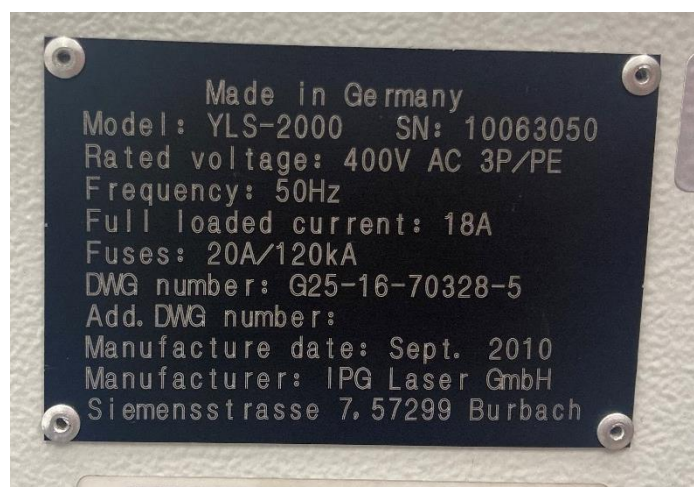
Ukázka vady ve svaru



Typický vzhled svaru provedeného hybridní laserovou technologií

PŘÍLOHA 2

Laserový stroj a jeho parametry



PŘÍLOHA 3

Tahové diagramy zkušebních vzorků

